

4. Печь «Индигирка». [Электронный ресурс]. URL: http://www.termofor.ru/catalog/model/pechi_portativnie/indigirka/

УДК 662.76

А. О. Овчарников, Н. А. Абаимов, А. Ф. Рыжков

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ КОКСА КАМЕННОГО УГЛЯ В ПРИБОРЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Аннотация

Кокс является важным металлургическим сырьём, поэтому изучение его кинетических характеристик позволит серьёзно повысить эффективность работы оборудования. Перспективным методом определения кинетических свойств твёрдого топлива является термогравиметрический анализ (ТГА). Прибор ТГА (в частности печь) конструктивно сложен и не позволяет экспериментально определять некоторые важные параметры процесса, такие как аэродинамические особенности и распределение газов в объёме печи. Данные параметры, как правило, определяют методом вычислительной гидродинамики (CFD). В данном докладе моделировалось внутреннее пространство печи, включающее тигли, подставку, держатель и трубку подачи защитного газа (аргона). В первом случае расчёт проводился для двух пустых тиглей, а во втором - для одного пустого и одного с навеской кокса Кузнецкого каменного угля марки Д. Моделируемая система считалась изотермичной с температурой 700°С и, соответственно, диффузионным режимом выгорания кокса. Сравнение результатов, полученных для двух вышеописанных случаев, позволило установить характер влияния процесса горения кокса в одном из тиглей на аэродинамику и концентрационные поля внутри печи прибора ТГА.

Ключевые слова: термогравиметрический анализ (ТГА), вычислительная гидродинамика (CFD), кокс угля, кинетика химических реакций, ламинарное течение.

Abstract

Coke is an important metallurgical raw material, so the study of its kinetic characteristics allows to seriously improving the efficiency of the equipment. A promising method for determining the kinetic properties of solid fuels is a thermal gravimetric analysis (TGA). TGA instrument (particularly bake) structurally complicated and does not allow to experimentally determining some important process parameters such as aerodynamic characteristics, and distribution of gases in the kiln volume. These parameters are generally determined by computational fluid dynamics (CFD). The report modeled the interior of the furnace, including crucibles, stand, holder and tube shielding gas (argon). In the first case, the calculation was carried out for two empty crucibles, and in the second - one empty and one with the sample coke Kuznetsk coal brand D. Simulated system is considered to be isothermal with a temperature of 700 °C and, accordingly, the diffusion regime burning coke. Comparing the results obtained for the above two cases, allowed establishing the nature of the influence of coke combustion process in one of the crucibles on aerodynamics and concentration fields inside the furnace TGA instrument.

Keywords: thermal gravimetric analysis (TGA), computational fluid dynamics (CFD), coal coke, chemical reaction kinetic, laminar flow.

1 Введение

В металлургии большую часть продукции получают путем выплавки чугуна в доменных печах. Топливом в доменной печи является кокс. Для эффективного управления процессом горения кокса необходимо знать кинетические характеристики его реагирования. Одним

из современных инструментов определения кинетических свойств твёрдых топлив является прибор термогравиметрического анализа (ТГА), принцип которого заключается в измерении убыли массы образца топлива, который находится на весах, расположенных в печи, при обдувании того газовой средой определённого состава и температуры. Из измерительных приборов в печи находятся лишь термопары для определения температуры образца. Поэтому для определения аэродинамических характеристик и концентрационных полей требуется прибегать к инструментам моделирования, наиболее функциональным из которых является метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Цель работы – численное исследование гидродинамических процессов при горении кокса каменного угля в приборе ТГА.

Для достижения поставленной цели надо решить следующие задачи:

- 1) подготовить CFD-модель внутреннего пространства печи прибора ТГА со всеми необходимыми подмоделями;
- 2) проанализировать полученные расчётные результаты по гидродинамике и концентрационным полям газов в печи;
- 3) оценить влияние процесса горения кокса угля на процессы, происходящие внутри прибора.

2 Описание работы прибора ТГА

Термический анализатор NETZSCH STA 449 F3 Jupiter позволяет выполнять измерения изменения массы и тепловых эффектов, при температурах до 1250°C. Моделируемый эксперимент представлял собой процесс сжигания кокса Кузнецкого каменного угля марки Д в одном из двух тиглей. Второй тигель остаётся пустой, чтобы можно было сравнить температуру тигля с топливом и с пустым определить тепловой эффект реакции. На рисунке 1 показана схема держателя с тиглями. Сверху на тигли подается воздух. Снизу по трубке подается защитный газ – аргон. Печь нагревалась от 35°C до 900°C со скоростью 40 К/с.

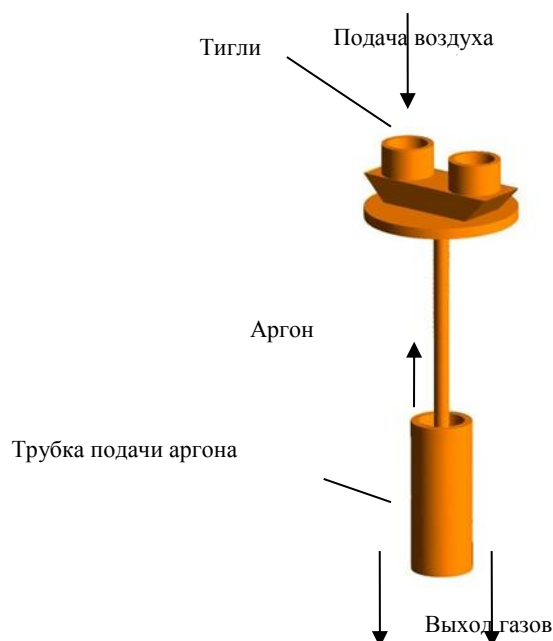


Рис. 1. Схема движения газов внутри печи прибора ТГА

3 Описание модели

Геометрия модели представляла собой внутреннее пространство печи, включающее в себя трубку подачи защитной среды, держатель, подставку и тигли. Геометрия имеет плоскость симметрии, проходящую через центры тиглей и ось симметрии печи, поэтому моделирование проводилось для одной из симметричных половин, это позволило сократить время расчёта. Длина цилиндра (печи) – 74 мм, радиус – 16.7 мм.

На основании данной геометрии построена сетка с 500 тыс. расчётных элементов, наиболее детальная часть которой представлена на рисунке 2.

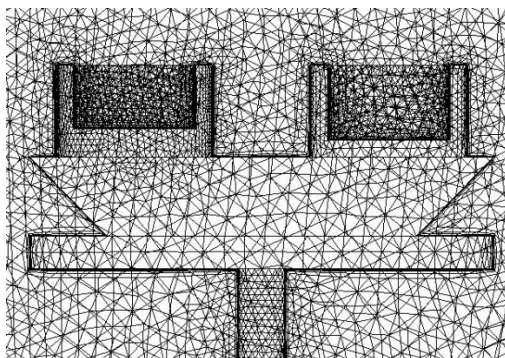


Рис. 2. Расчётная сетка вблизи тиглей

Массовые расходы воздуха и аргона равны $1.3611 \cdot 10^{-6}$ кг/с и $5.9 \cdot 10^{-7}$ кг/с соответственно. Зона реагирования кокса угля с кислородом воздуха была представлена в виде круга – поверхности, соединяющей навеску и газовый объём. Данное допущение справедливо, так как в этом температурном диапазоне горение носит диффузионный характер (без проникновения кислорода в толщу слоя кокса угля). Считалось, что горение проходит по реакции полного окисления углерода топлива кислородом воздуха до углекислого газа. Исходя из экспериментально определённой убыли массы навески рассчитаны расходы газов-реагентов: поглощение $O_2 - 3.33 \cdot 10^{-8}$ кг/с; образование $CO_2 - 4.583 \cdot 10^{-8}$ кг/с.

Для моделирования не потребовалось использования моделей турбулентности, так как число Рейнольдса составило 57 (ламинарное течение), что намного меньше критического. Смесь газов состояла из Ar, CO_2 , N_2 , O_2 . Абсолютное давление составляло 1 атм. Система изотермическая с температурой $700^\circ C$. На стенках – условия прилипания.

4 Результаты

На рисунке 3 приведены результаты моделирования процессов, происходящих в печи, с двумя пустыми тиглями, а на рисунке 4 с одним пустым и вторым с навеской топлива.

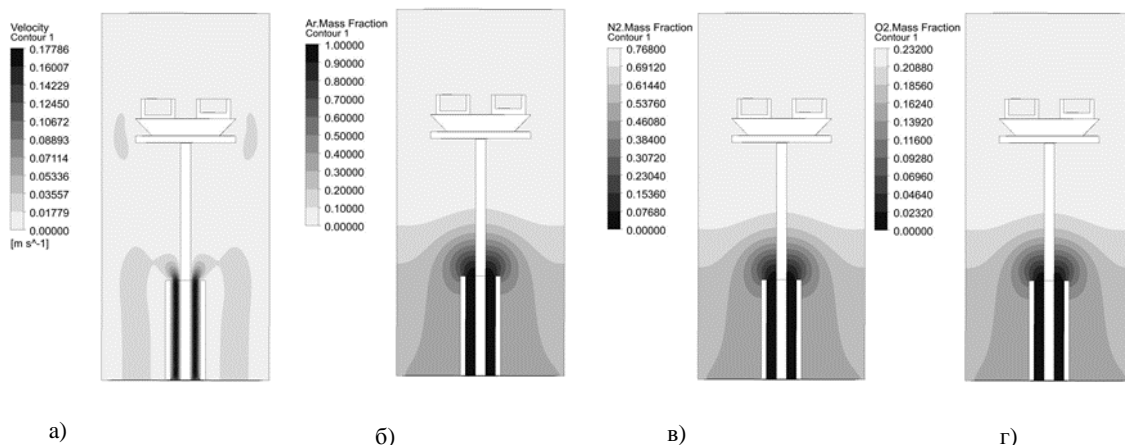


Рис. 3. Результаты моделирования с двумя пустыми тиглями (без горения кокса): а) скорость; б) концентрация аргона; в) концентрация азота; г) концентрация кислорода

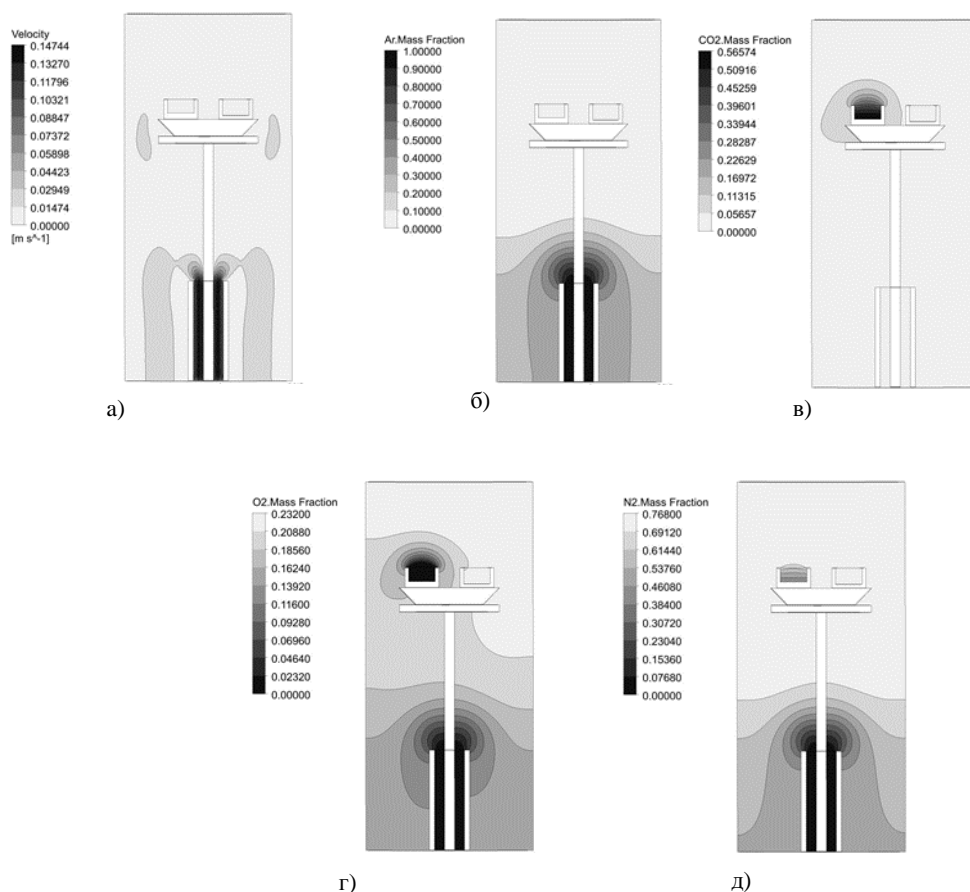


Рис. 4. Результаты моделирования с одним пустым и одним тиглем с навеской кокса угля (с горением кокса):

а) скорость; б) концентрация аргона; в) концентрация диоксида углерода; г) концентрация кислорода; д) концентрация азота

Как видно из рисунков, в эксперименте с горением кокса в одном из тиглей и без него отличаются значения скорости и концентраций в результате выделения CO_2 . В обоих случаях концентрации N_2 и O_2 , приближаясь к линии подвода аргона, начинают падать. Скорость газов не изменяется до тиглей, но из-за сужения свободного пространства локально увеличивается и далее возрастает благодаря подмешиванию аргона. В пространстве возле тигля концентрации кислорода и азота падают. В первом случае из-за поглощения O_2 , во втором из-за добавления CO_2 .

5 Заключение

Термогравиметрический анализатор – сложный прибор, применяемый для получения данных о кинетике гетерогенных реакций, но он не дает понимания происходящих в нем гидрогазодинамических процессов. Численное моделирование позволяет выявить необходимые параметры работы печи и оптимизировать методику проведения экспериментов.

Сравнение расчётных результатов моделирования работы прибора с навеской топлива и без неё показало, что при сжигании топлива меняются скорости и концентрации газов внутри печи. Концентрации исходных газов снижаются из-за добавления в смесь диоксид углерода.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение нестационарных явлений во время переходных процессов внутри печи прибора ТГА, а также на моделирование распределения газов в слое кокса угля.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).